

Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”
Instituto de Química – Câmpus de Araraquara

**APLICAÇÕES DE MISTURADORES DO TIPO SIGMA E TRIPLE SHAFT NA
INDÚSTRIA: UMA REVISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso

LUÍSA BATISTA ENÉAS PINTO

Araraquara, SP

2025

LUÍSA BATISTA ENÉAS PINTO

**APLICAÇÕES DE MISTURADORES DO TIPO SIGMA E TRIPLE SHAFT NA
INDÚSTRIA: UMA REVISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado
ao Instituto de Química – Unesp/Araraquara como
requisito parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.a Dra. Lorena Oliveira Pires

Araraquara, SP

2025

P659a Pinto, Luísa Batista Enéas
Aplicações de misturadores do tipo sigma e triple shaft na indústria:
uma revisão / Luísa Batista Enéas Pinto. -- Araraquara, 2025
54 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de
Química, Araraquara
Orientadora: Lorena Oliveira Pires

1. Máquinas de misturar. 2. Revisão. 3. Aplicações industriais. 4.
Adesivos. 5. Misturas (Química). I. Título.

Luísa Batista Enéas Pinto

**APLICAÇÕES DE MISTURADORES DO TIPO SIGMA E TRIPLE SHAFT NA
INDÚSTRIA: UMA REVISÃO**

Aprovado em:

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado
ao Instituto de Química – Unesp/Araraquara como
requisito parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arnaldo Sarti
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Prof. Dra. Kelly Johana Dussan Medina
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Profa. Dra. Lorena Oliveira Pires
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre apoiou cada uma das minhas escolhas, me deu suporte constante e celebrou comigo as minhas conquistas. Em especial, sou profundamente grata aos meus pais, que incentivaram meus estudos, acreditaram nos meus sonhos e nunca duvidaram da minha capacidade.

Aos amigos e amigas que encontrei ao longo da graduação, agradeço a parceria, pelos desafios compartilhados e pelos aprendizados que contribuíram para a profissional e a pessoa que me tornei.

Ao meu namorado, que me acompanhou e me apoiou durante o período em que precisei deixar minha casa para seguir meus objetivos.

Aos docentes do curso de Engenharia Química da UNESP – Araraquara, agradeço por transmitirem seus conhecimentos de forma didática e essencial para a minha formação. Em especial, agradeço à professora Lorena Oliveira Pires, pelo tempo e dedicação durante a orientação deste trabalho.

Por fim, agradeço aos profissionais que me acolheram durante o estágio, sempre dispostos a compartilhar seus conhecimentos e a me apoiar nas decisões que marcaram minha trajetória profissional até o momento.

RESUMO

A produção de produtos homogêneos com elevada qualidade e desempenho tecnológico exige o uso de misturadores adequados às diferentes demandas da indústria química, os quais variam em formato, tamanho e aplicação, de forma a atender as especificações do mercado. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre as aplicações dos misturadores na indústria química, com ênfase nos princípios de funcionamento, características operacionais, vantagens e limitações dos misturadores do tipo Sigma e Triple Shaft. Foram analisados estudos que abordam o comportamento fluidodinâmico desses equipamentos, os principais parâmetros de mistura, a eficiência energética e a qualidade do material obtido. De modo geral, os misturadores Sigma são equipamentos horizontais, dotados de lâminas simples ou duplas em formato sigma, que se destacam pela eficiência na homogeneização de materiais altamente viscosos, sendo amplamente utilizados na produção de silicones, adesivos, polímeros e produtos alimentícios. Em contrapartida, os misturadores Triple Shaft são equipamentos verticais compostos por um conjunto de impulsores dispostos em três eixos, apresentando elevada eficiência de mistura, versatilidade operacional e possibilidade de operação sob vácuo, aquecimento e resfriamento, o que os torna especialmente adequados para a fabricação de adesivos, selantes, cosméticos e compostos epóxi. Assim, conclui-se que ambos os sistemas desempenham papel fundamental na otimização de processos industriais, contribuindo para a qualidade, produtividade e segurança dos processos químicos, sendo a escolha do equipamento mais adequado dependente das características do produto, das condições operacionais e dos objetivos do processo.

Palavras-chave: Triple Shaft. Sigma. Misturadores industriais. Indústria química.

ABSTRACT

The production of homogeneous products with high quality and technological performance requires the use of mixers suited for different demands of the chemical industry, which vary in shape, size and application, in order to meet market specifications. In this context, this paper presents a literature review on the applications of mixers in the chemical industry, with an emphasis on the operating principles, operational characteristics, advantages, and limitations of Sigma and Triple Shaft mixers. Studies addressing the fluid dynamic behavior of this equipment, the main mixing parameters, energy efficiency, and the quality of the material obtained were analyzed. In general, Sigma mixers are horizontal devices equipped with single or double blades in a sigma shape, which stand out for their efficiency in homogenizing highly viscous materials and are widely used in the production of silicones, adhesives, polymers, and food products. In contrast, Triple Shaft mixers are vertical devices composed of a set of impellers arranged on three shafts, offering high mixing efficiency, operational versatility, and the possibility of operating under vacuum, heating, and cooling, which makes them especially suitable for the manufacture of adhesives, sealants, cosmetics, and epoxy compounds. Thus, it can be concluded that both systems play a fundamental role in the optimization of industrial processes, contributing to the quality, productivity and safety of chemical processes, with the choice of the most suitable equipment dependent on the characteristics of the product, the operating conditions, and the objectives of the process.

Keywords: Triple Shaft. Sigma. Industrial mixers. Chemical industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Misturador por campanha	14
Figura 2: Misturador contínuo	15
Figura 3: Misturador de alto cisalhamento.....	16
Figura 4: Misturador de baixo cisalhamento.....	16
Figura 5: Diferença entre impelidores - alto cisalhamento versus baixo cisalhamento	17
Figura 6: Misturador planetária.....	17
Figura 7: Misturador do tipo Sigma com lâminas tangenciais e descarga por tombamento	18
Figura 8: Lâmina Tangencial x Sobreposta	19
Figura 9: Misturador do tipo Sigma encamisado	20
Figura 10: Misturador do tipo Triple Shaft.....	24
Figura 11: Esquema de funcionamento do misturador do tipo Triple Shaft	26
Figura 12: Misturador do tipo Triple Shaft com válvula de descarga por gravidade....	27
Figura 13: Modelo de sistema de prensa para envase	28
Figura 14: Configuração de mistura. (1) Misturador, (2) Painel de controle e display de temperatura, (3) Trocador de calor e (4) Bomba de vácuo.....	32
Figura 15: Ilustração computacional do misturador Sigma, vista superior (a) e vista lateral (b).....	32
Figura 16: Gráfico da temperatura superficial da mistura em função do tempo considerando resultados obtidos em experimento e em simulação de calibração, CA23	34
Figura 17: Perfil de temperatura da mistura para simulação NA50 em $t = 15s$	35
Figura 18: Temperatura média da mistura em função do tempo para todas as simulações	35
Figura 19: Perfil de velocidade (m/s) para a simulação A80 em diferentes tempos.....	36
Figura 20: Coeficiente de mistura de Kramer (M_{Kramer}) com o tempo, para diferentes simulações	37
Figura 21: Histograma do coeficiente de mistura de Manas-Zlacower em $t = 1800s$... 38	
Figura 22: Valor médio do coeficiente de mistura de Manas-Zlacower com o tempo . 39	
Figura 23: Pontos de amostragem no misturador Sigma durante produção de uma pasta propelente	40
Figura 24: Variação de densidade do propelente sólido e do coeficiente de variação (cv) em função do tempo total de mistura.....	40

Figura 25: Esquema do misturador multi-eixos	43
Figura 26: Misturador multi-eixos desenvolvido com a empresa Kniele GmbH	43
Figura 27: Característica de potência do agitador principal para diferentes velocidades de rotação e ângulos das pás.....	45
Figura 28: Característica de potência do agitador secundário para diferentes sentidos de rotação e ângulos das pás do agitador principal	46
Figura 29: Dissipação média de energia para diferentes relações de velocidade.....	47
Figura 30: Número de potência para diferentes relações de velocidade	48
Figura 31: Esquema de estrutura do misturador do tipo Dual Shaft e Triple Shaft	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações de condição de contorno, temperatura inicial e tempo de simulação para diferentes modelos de calibração.....	33
Tabela 2: Características dos fluxos gerados para diferentes tipos de rotação.....	44

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
2. Objetivos.....	11
3. Aplicações e finalidades	12
4. Tipos de misturadores industriais	14
4.1. Misturadores descontínuos ou por campanha (<i>batch</i>).....	14
4.2. Misturadores contínuos	14
4.3. Misturadores de alto cisalhamento (<i>High-shear</i>)	15
4.4. Misturadores de baixo cisalhamento (<i>Low-shear</i>).....	16
4.5. Misturadores multi-eixo (<i>Multi-Shaft</i>).....	17
5. Misturadores do tipo Sigma.....	18
5.1. Funcionamento	19
5.2. Vantagens e desvantagens	21
5.3. Aplicação na indústria	22
6. Misturadores do tipo Triple Shaft.....	24
6.1. Funcionamento	25
6.2. Vantagens e desvantagens	28
6.3. Aplicação na indústria	29
7. Estudos de caso: Misturadores Sigma	31
7.1. O efeito do aquecimento na mistura [31]	31
7.2. Avaliação do tempo de mistura [32]	39
8. Estudos de caso: Misturadores Triple Shaft	42
8.1. Pontos ótimos de operação do misturador [33]	42
8.2. Misturador Dual Shaft <i>versus</i> Triple Shaft [34]	48
9. Conclusão	50
REFERÊNCIAS	51

1. Introdução

A crescente demanda por produtos com elevado padrão de qualidade e desempenho tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento e a utilização de equipamentos de mistura cada vez mais eficientes na indústria. Nesse contexto, o aprimoramento dos misturadores industriais foi essencial para o crescimento do setor químico, uma vez que esses dispositivos mecânicos possibilitam a homogeneização eficiente, controlada e estável de diferentes materiais, resultando em produtos de alta qualidade [1].

Dependendo da aplicação desejada, os misturadores industriais podem ser projetados em diferentes estruturas e tamanhos, de modo a se adaptarem às exigências do processo produtivo, permitindo a mistura de substâncias líquidas, gasosas, partículas sólidas, pós ou pastas. De forma geral, esses equipamentos são constituídos por um tanque ou vaso de mistura, sistemas de transmissão e motores, além de um sistema de agitação composto por pás ou lâminas, podendo ainda apresentar recursos que possibilitam operações sob aquecimento, resfriamento e vácuo, conforme a necessidade do processo [2].

Dentre os diversos tipos de misturadores disponíveis, destacam-se os misturadores do tipo Sigma e Triple Shaft, amplamente empregados em setores como o químico, alimentício, cosmético e de polímeros, especialmente em processos que envolvem materiais de elevada viscosidade e comportamento reológico complexo.

Além disso, o presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como motivação a experiência adquirida durante o estágio e posterior efetivação da autora no departamento de Engenharia de Processos de uma multinacional alemã, empresa reconhecida pela diversidade de produtos nos setores de bens de consumo e tecnologias adesivas.

No período de um ano, entre 2024 e 2025, foi possível acompanhar a produção de diversos tipos de adesivos industriais, como massas de PVC e butílicas e produtos anaeróbicos, os quais são amplamente utilizados em setores como a eletrônica e a indústria automotiva. Assim, essa vivência prática despertou o interesse em aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento e as aplicações dos misturadores utilizados na produção de soluções adesivas.

2. Objetivos

O foco deste trabalho está em explorar os misturadores do tipo Sigma e Triple Shaft, que são amplamente empregados na fabricação de adesivos industriais e o principal objetivo é, a partir de uma revisão bibliográfica, compreender os princípios operacionais desses equipamentos, suas vantagens e limitações, bem como sua relevância para a eficiência e qualidade do processo de produção.

Assim, o presente estudo visa contribuir para a compreensão técnica e prática dos misturadores utilizados nessa multinacional, alinhando a teoria à experiência profissional adquirida, com o intuito de reconhecer oportunidades de aprimoração nos seus processos de produção e otimizar a utilização desses equipamentos.

3. Aplicações e finalidades

Os misturadores industriais apresentam uma ampla variedade de aplicações e finalidades, que variam de acordo com o setor em que são empregados e com as exigências específicas de cada processo produtivo. De modo geral, esses equipamentos desempenham papel fundamental na garantia da qualidade, eficiência e segurança dos produtos, sendo projetados para atender a diferentes demandas operacionais ao longo das cadeias industriais.

Uma das principais finalidades dos misturadores industriais é a promoção da homogeneização e da mistura adequada das matérias-primas, assegurando que o produto apresente composição uniforme, preserve as suas características desejadas, como textura, sabor, cor e consistência, e atinja a sua performance esperada. Nesse sentido, o uso desses equipamentos permite a mistura completa dos componentes, evitando a formação de grumos e bolsões de concentração indesejados, o que contribui para a maximização da capacidade produtiva da planta e para a redução de desperdícios de matérias-primas [3].

Além disso, os misturadores industriais desempenham papel relevante na aceleração de reações químicas, uma vez que garantem o contato eficiente entre os reagentes por meio da agitação adequada e do controle das condições operacionais, como a temperatura. Ao promover uma interação mais eficaz entre as matérias-primas, esses equipamentos possibilitam o aumento da taxa de reação, resultando em processos mais rápidos, eficientes e com maior rendimento e seletividade, o que se reflete diretamente no aumento da produtividade industrial [1].

Outra função essencial desses equipamentos está relacionada à transferência de calor durante o processo de mistura, seja por aquecimento ou resfriamento do sistema. Para isso, os misturadores podem ser projetados com estruturas específicas, como camisas ou serpentinas, que permitem o controle térmico da mistura ao longo do processo. Tal recurso é particularmente importante em operações que exigem condições rigorosas de temperatura ou que envolvem reações exotérmicas ou endotérmicas, contribuindo tanto para a qualidade do produto quanto para a segurança do processo [1].

Os misturadores industriais também são amplamente utilizados na manipulação de materiais altamente viscosos ou de sistemas sólido-líquidos, cuja mistura apresenta desafios significativos em função de suas propriedades físicas e químicas. Nesses casos, torna-se necessário o emprego de misturadores robustos e de elevada potência, capazes de vencer a resistência ao escoamento do material, promover a quebra de aglomerados e

assegurar a distribuição uniforme das partículas sólidas, resultando na completa homogeneização da mistura [1].

Por fim, destaca-se a contribuição dos misturadores industriais para a economia de recursos, uma vez que, em geral, esses equipamentos apresentam configuração compacta, baixo consumo energético e elevado aproveitamento de matérias-primas. Além disso, os avanços no desenvolvimento de seus projetos têm priorizado a redução de emissões, a diminuição do consumo de energia e a otimização do uso de recursos, alinhando os processos industriais às demandas por maior eficiência e sustentabilidade [2].

Dessa forma, em virtude da diversidade de funções exercidas pelos misturadores industriais ao longo dos processos produtivos, esses equipamentos tornam-se indispensáveis em diferentes setores da indústria, em especial na indústria civil e química, onde tais operações são determinantes para a eficiência e a qualidade do produto.

Na indústria civil, eles são essenciais na fabricação e preparação do concreto, uma vez que nesses equipamentos as matérias primas são alimentadas no alimentador e o concreto é misturado, gerando um produto homogêneo que pode ser coletado na sua outra extremidade. Assim, esses misturadores são essenciais na produção da quantidade exata de material necessária para construção de estruturas como fundações, pontes, aeroportos, lajes, barragens, ferrovias e paredes [4].

Já na indústria química, os misturadores são comumente utilizados nos setores farmacêuticos e alimentícios, para uma vasta gama de aplicações, como a suspensão de sólidos, mistura de aditivos, tratamento de águas residuais, emulsificação, dispersão de gás e entre outros [4].

Além disso, esses equipamentos são utilizados na produção de tintas, adesivos, revestimentos, etanol, remédios, massas de bolo e durante o processamento mineral [4].

No caso da fabricação de tintas e resinas, os misturadores industriais garantem a sua devida homogeneização, de forma que a cor e consistência desejada sejam atingidas. Além disso, eles permitem a dispersão de aditivos responsáveis por aumentar a durabilidade do acabamento da tinta. Dentre os principais tipos de misturadores utilizados na produção de tintas destacam-se os misturadores de alto cisalhamento, misturadores de tambor e misturadores de pá [4].

Já na mineração, esses misturadores são amplamente aplicados na lixiviação de ouro e na destruição de cianeto, sendo esta determinante para prevenir que ocorram derramamentos de cianeto, o que poderia impactar negativamente a segurança do meio [4].

4. Tipos de misturadores industriais

Com o passar dos anos, foram desenvolvidos diversos tipos de misturadores industriais, de forma a garantir que diferentes tipos de lâminas e diferentes configurações de mistura fossem desenvolvidas para atender às demandas e características desejadas de cada produto. Dentre os principais tipos de misturadores temos:

4.1. Misturadores descontínuos ou por campanha (*batch*)

Esses misturadores são os mais comuns nas indústrias e são adequados para processos que envolvem lotes de pequeno a médio porte e em casos que se espera ter maior flexibilidade e possibilidade de personalização do processo [3].

Esses equipamentos envolvem a combinação de todas as matérias primas até que a mistura atinja a sua consistência e homogeneidade desejada [5].

Com relação à sua estrutura (Figura 1), muitos deles podem ser acoplados a um recipiente de mistura, permitindo que o operador seja capaz de movimentá-lo [5]. Além disso, esses misturadores podem apresentar uma estrutura portátil, garantindo ampla versatilidade [5].

Figura 1: Misturador por campanha



Fonte: INDIAMART (2025).

4.2. Misturadores contínuos

Trata-se de misturadores em linha conectados a parte do processo [5] e que são adequados para processos em fluxo contínuo de uma grande quantidade de materiais, de forma a garantir a sua mistura constante por um longo período [3]. Assim, esses

equipamentos (Figura 2) são mais adequados para linhas em que se tem poucas variações na composição da mistura e no processo [6].

A mistura contínua envolve baixa energia, mas garante um alto rendimento e implica uma alimentação constante de matérias primas no misturador simultaneamente ao descarregamento contínuo do produto desejado [5].

Uma vantagem desse tipo de misturador é que ele permite ser integrado a um sistema de monitoramento, permitindo que o processo de mistura seja precisamente controlado.

Figura 2: Misturador contínuo



Fonte: READING BAKERY SYSTEMS (2025).

4.3. Misturadores de alto cisalhamento (*High-shear*)

Estes misturadores são comumente utilizados para dispersar sólidos em líquidos e criar emulsões, de forma a promover uma agitação intensa em materiais que, devido a sua estrutura, são considerados difíceis de se misturar [5].

A sua estrutura (Figura 3) apresenta um rotor e um estator e envolve o uso de lâminas rotativas em alta velocidade, de forma a criar forças de cisalhamento intensas e suficientemente capazes de quebrar as partículas e dispersá-las [6].

Figura 3: Misturador de alto cisalhamento



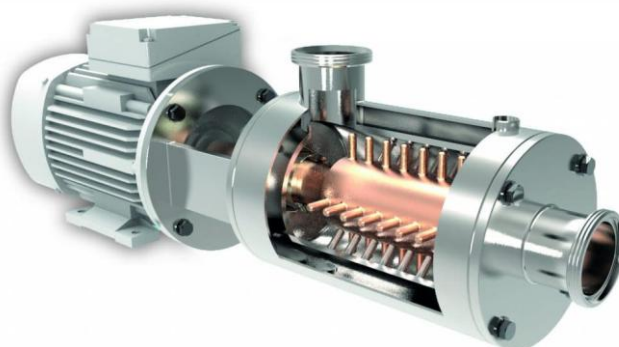
Fonte: DIRECT INDUSTRY (2025).

4.4. Misturadores de baixo cisalhamento (*Low-shear*)

Em contrapartida, os misturadores de baixo cisalhamento (Figura 4) são utilizados quando espera-se realizar um processo de mistura delicado e suave, de forma a não causar danos nas estruturas dos materiais nem alterar as suas propriedades [5].

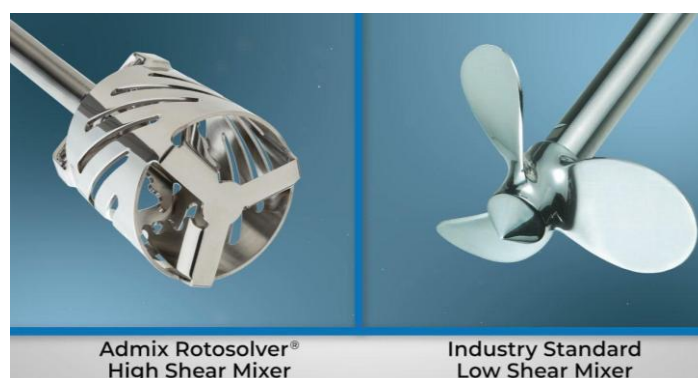
A Figura 5 ilustra a diferença física entre um tipo de impelidor que pode ser utilizado nos misturadores de alto cisalhamento (*High Shear Mixer*) e baixo cisalhamento (*Low Shear Mixer*).

Figura 4: Misturador de baixo cisalhamento



Fonte: CONTINUOUS MIXING (2025).

Figura 5: Diferença entre impelidores - alto cisalhamento *versus* baixo cisalhamento



Fonte: ADMIX MIXING TECHNOLOGY (2021).

4.5. Misturadores multi-eixo (*Multi-Shaft*)

Atualmente tem-se diversos tipos de misturadores de eixos múltiplos que, apesar de operarem de forma semelhante, podem ser personalizados de acordo com a necessidade do processo e do produto desejado pelo cliente [5]. Os mais comuns são os misturadores de eixo duplo (*Dual-Shaft*), eixo triplo (*Triple-Shaft*), planetários (Figura 6) e recíprocos.

Figura 6: Misturador planetária



Fonte: PROMAS ENGINEERS (2025).

5. Misturadores do tipo Sigma

Os misturadores do tipo Sigma (Figura 7), correspondem a uma calha retangular com a sua parte inferior curvada, formando dois semicilindros, para que duas lâminas paralelas e contra rotativas em forma de “w” e fixadas horizontalmente fiquem acopladas e sejam capazes de varrer toda a área formada pelo semicilindro e de transmitir movimento transversal e lateral à mistura [7] [8]. Ainda é possível que o misturador seja composto por apenas uma lâmina, no entanto a sua eficiência de amassamento será reduzida em comparação àqueles compostos por duas lâminas.

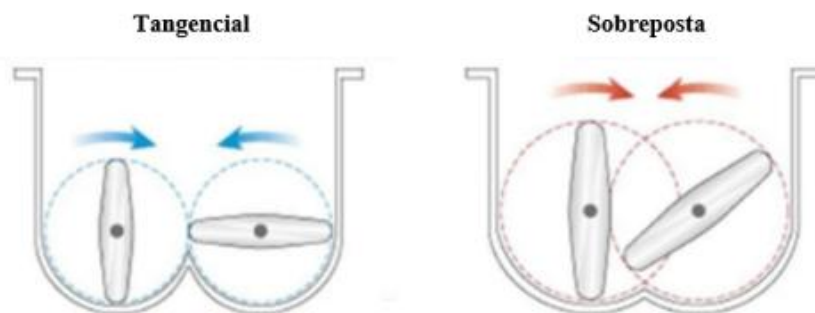
Figura 7: Misturador do tipo Sigma com lâminas tangenciais e descarga por tombamento



Fonte: FOOD AND BIOTECH (2025).

Os misturadores Sigma caracterizam-se por serem utilizados em processos em batelada e a ação da mistura envolve a combinação de diferentes fenômenos físicos, dentre eles o estiramento, recombinação, cisalhamento e divisão da massa que está sendo processada entre as paredes do misturador e as lâminas do Sigma [9], resultando em uma excelente mistura cruzada das matérias primas envolvidas na mistura.

As lâminas podem ser tangenciais entre si ou sobrepostas (Figura 8) e rotacionam simultaneamente de forma a garantir uma mistura homogênea e uniforme da massa de interesse. Dessa forma, esses equipamentos são amplamente utilizados na indústria química, uma vez que a sua estrutura robusta promove uma mistura constante e eficiente de materiais de elevada viscosidade, densos e pegajosos de forma a garantir uniformidade e consistência no produto [7] [10].

Figura 8: Lâmina Tangencial x Sobreposta

Fonte: Adaptado de UNIQUE MIXER (2025).

Considerando a posição das lâminas no misturador, ambos os tipos de lâminas ficam próximas das paredes do misturador, permitindo que o material seja cortado, amassado e comprimido contra as paredes do misturador e que todas as partículas estejam sob a ação de mistura das lâminas e em constante movimento, e apresentam uma pequena distância entre si, permitindo um aumento no cisalhamento interno e uma redução no tamanho das partículas, resultando em uma mistura homogênea. Dessa forma, os misturadores do tipo Sigma podem resultar em uma homogeneidade de até 99% da massa desejada e são aplicáveis a diferentes consistências de misturas, podendo ser pós secos ou até massas plásticas rígidas [8] [10]. Ainda vale ressaltar que quanto menor a distância entre as paredes do misturador e as lâminas, mais eficiente será o processo de mistura e amassamento do material desejado [11].

Este tipo de misturador possui um elevado consumo de energia em comparação com outros misturadores e seu consumo pode variar de 45 a 75 kW/m³ [10]. Dentre os principais motivos para tal efeito destaca-se o fato desse misturador trabalhar com materiais de viscosidade e densidade elevada, exigindo mais torque e potência do motor, e por tratar-se de um processo de mistura em batelada, o que reduz a eficiência energética do processo em comparação com um sistema que trabalha de forma contínua [12].

Ainda vale ressaltar que, a fim de garantir a máxima proteção e segurança dos operadores em contato com os misturadores Sigma é importante que a sua estrutura possua grelhas e intertravamentos que impeçam que o operador entre em contato com as partes móveis do equipamento, evitando acidentes durante o processo [9].

5.1. Funcionamento

De forma geral, as matérias primas são carregadas na parte superior do misturador, de forma a preencher de 40 a 65% do seu volume total e as lâminas são acionadas a partir de

um sistema formado por engrenagens, acoplamentos e motor, podendo ser rotacionadas em direções opostas, garantindo o amassamento e corte eficaz dos materiais em um período de tempo curto (10 a 30 minutos, aproximadamente), e geralmente são feitas de materiais capazes de suportar o rigor da mistura de diversas substâncias, como é o caso do aço inoxidável [13] [14]. Além disso, dependendo da característica e necessidade do processo, é possível personalizar o ângulo de torção da lâmina para que ele se adeque ao processo [15].

Os Sigmas podem ser operados à diferentes temperaturas e velocidades, variando com a necessidade das matérias primas e do produto. No caso de operação sob temperaturas controladas, o misturador deverá apresentar camisas que permitam a circulação de fluido quente ou frio, de forma a garantir o aquecimento ou resfriamento da mistura conforme necessidade do processo [10]. Dentre os possíveis métodos de transferência de calor destacam-se o resfriamento de água circulante, aquecimento a vapor, aquecimento elétrico e o aquecimento de óleo quente circulante [16]. No caso do misturador ser operado à temperatura ambiente, não serão necessárias modificações na sua estrutura. A Figura 9 apresenta um misturador do tipo Sigma encamisado, o qual pode ser identificada pelo ponto de entrada/saída de fluido indicado na imagem por um círculo vermelho.

Figura 9: Misturador do tipo Sigma encamisado



Fonte: SPARKLER FILTER PRESS (2025).

No caso das lâminas tangenciais, a sua velocidade será diferente entre si, sendo, em geral, a lâmina dianteira mais rápida que a lâmina traseira, com uma proporção de 3 para 2, em geral. Assim, essas lâminas são comumente utilizadas para homogeneizar materiais com viscosidade elevada, como é o caso de corantes, adesivos e compostos de borracha.

Já no caso das lâminas sobrepostas a sua velocidade será igual para ambas, uma vez que a posição relativa das duas lâminas não pode ser alterada, e ela é comumente utilizada para homogeneizar materiais de viscosidade mais baixa, como é o caso de cremes e pomadas. Assim, a lâmina tangencial é mais indicada quando se pretende obter uma mistura e um cisalhamento maiores [10] [11].

De forma geral, os misturadores Sigma permitem que os operadores modifiquem e controlem a sua velocidade, assim é possível intensificar ou atenuar a mistura com base no produto desejado e no material que está sendo processado [17].

Atualmente tem-se três formas de descarregar a massa pronta do misturador, sendo elas por meio da inclinação do misturador em direção ao recipiente que se pretende envasar o produto, por meio do acionamento de uma rosca extrusora ou por meio do acionamento da válvula de descarga inferior [10].

No caso de descarga por meio da inclinação do misturador a sua operação pode ser mecanizada, a partir de um arranjo motorizado ou hidráulico, ou manual. A descarga a partir de uma rosca extrusora permite que o material seja extrudado no tamanho ou formato desejado para o material, além de ser um processo mais seguro ao operador, uma vez que reduz a sua exposição a materiais quentes ou de natureza tóxica. Por fim, para a descarga a partir de uma válvula de descarga inferior recomenda-se que o material seja de baixa viscosidade e que ela esteja nivelada com a calha do misturador a fim de evitar pontos mortos com material não misturado e, conseqüentemente, não homogêneo [9].

5.2. Vantagens e desvantagens

Para definir se um misturador é vantajoso para uma aplicação específica, é essencial compreender suas vantagens e limitações operacionais.

Dentre as suas principais vantagens, tem-se o fato dos misturadores Sigma garantirem uma mistura uniforme, especialmente de materiais de elevada viscosidade, uma vez que o seu design permite que uma grande variedade de matérias primas seja processada, serem versáteis, por possibilitarem o trabalho de materiais com um amplo range de viscosidade, atendendo principalmente àqueles produtos de elevada viscosidade, apresentarem um baixo custo de operação e manutenção, uma construção robusta e possibilitarem a sua personalização de acordo com a sua aplicação, apresentando uma estrutura feita de acordo com o processo que seja capaz de suportar elevadas tensões e, conseqüentemente, aumentando o seu tempo de vida útil [17] [18].

Dentre as suas principais desvantagens, destacam-se o alto investimento inicial necessário devido à sua estrutura robusta e possibilidade de inclusão de acessórios avançados, o fato de o seu uso ser limitado a materiais de alta viscosidade, não sendo muito aplicável à líquidos de baixa viscosidade, a dificuldade na sua limpeza devido a sua estrutura complexa, fechada e pela presença de lâmina, especialmente no caso de materiais pegajosos, a operação exclusivamente em batelada, assim o processo, dependendo da sua especificidade e objetivo, pode ser menos eficiente do que um sistema que opera continuamente e a sua baixa eficiência para lotes pequenos devido ao design e disposição das suas pás do Sigma já que a eficiência do amassamento e da mistura das matérias primas pode ser prejudicada quando se tem pouca quantidade de material [17] [18] [19].

5.3. Aplicação na indústria

Devido à sua versatilidade e capacidade de misturar pastas pegajosas e arenosas de elevada viscosidade, os misturadores Sigma são amplamente utilizados na indústria química [13]. Dentre as suas possíveis aplicações destacam-se a produção de borrachas butílicas, chicletes, giz de cera, detergentes, borrachas, explosivos, hotmelts, tintas, polímeros, silicones, revestimentos de PVC e dentre outros [10].

No setor alimentício, esses misturadores são usados com frequência para misturar massas para bolos, pães, chocolate, gomas de mascar, doces e outros produtos do ramo que sejam mais viscosos, uma vez que eles permitem garantir a consistência desses produtos. No setor farmacêutico são comumente utilizados na produção de cápsulas e comprimidos a partir da mistura de grânulos e pós, já que ele permite que ocorra uma dispersão uniforme dos ativos das formulações dos medicamentos [17]. Por fim, no setor químico, eles são usados para misturar selantes, adesivos e outros materiais de elevada viscosidade, uma vez que este tipo de misturador certifica que ocorra uma dispersão uniforme de cargas e aditivos em polímeros [14].

Ainda vale ressaltar que o uso de misturadores do tipo Sigma é essencial para garantir a consistência e a qualidade desejada ao produto na produção de silicones e adesivos.

Os silicones são caracterizados por apresentar ótimas propriedades de isolamento térmico, flexibilidade e resistência ao calor e são produzidos a partir da mistura de catalisadores, polímeros de silicone e cargas de reforço. Assim, a fim de garantir uma mistura homogênea, uma distribuição uniforme das cargas de reforço e catalisadores na

matriz do polímero e um produto curado de alta qualidade, o misturador Sigma é amplamente utilizado na produção destes materiais [7].

Já os adesivos são produzidos, geralmente, a partir da mistura de solventes, resinas e aditivos e são comumente utilizados para garantir a união de diversos materiais. Assim, o uso de misturadores Sigma na sua produção é de suma importância para garantir que os seus componentes estejam completamente dispersos no meio e que o adesivo apresente o desempenho de colagem esperado. Além disso, devido à força de cisalhamento proporcionada pelas lâminas do misturador, é possível controlar a viscosidade do adesivo, garantindo que ela se adeque a sua necessidade e aplicação específica.

6. Misturadores do tipo Triple Shaft

Os misturadores do tipo Triple Shaft (Figura 10), ou simplesmente Tri-Shaft, assim como os misturadores do tipo Sigma, também se destacam como um sistema eficiente para misturar e homogeneizar uma diversa gama de substâncias, como grânulos, pós, pastas, géis, cremes e líquidos, ao mesmo tempo que garantem a produção de materiais de qualidade e resultados estáveis, o que se deve especialmente pela sua elevada capacidade de cisalhamento [20]. Além disso, como consequência da sua possibilidade de trabalhar de forma combinada a velocidades baixas e elevadas, esse misturador apresenta bom desempenho para materiais de média e alta viscosidade e tixotrópicos [21] [22].

Dependendo da aplicação desses misturadores, é possível que eles possuam uma camisa para que ocorra a passagem de um fluido quente, no caso em que se pretende aquecer a mistura, ou um fluido frio, no caso em que se espera resfriá-la. Além disso, também é possível estruturá-los de forma a permitir a sua operação sob alto vácuo, sendo este um artifício importante para reduzir a quantidade de bolhas presentes no produto e dar um aspecto mais fluido e homogêneo ao produto [23].

Figura 10: Misturador do tipo Triple Shaft



Fonte: CMC MILLING (2025).

O recipiente (tacho) em que ocorre a mistura desses misturadores pode ser fixa ou móvel, dependendo com o tipo de descarga do produto e da sua viscosidade. No caso de recipientes móveis, o cabeçote do agitador e do misturador deve apresentar um arranjo que possibilite a sua elevação para fora do tacho, permitindo a troca desses recipientes [23]. Esse design permite uma operação semicontínua, de forma que o processo seja

dividido em 4 etapas, mistura, descarga, limpeza e preparação, e que vários recipientes sejam utilizados ao mesmo tempo em etapas diferentes, ampliando, assim, a produção de um único misturador [24].

Para o caso de design fixo, é importante que o misturador apresente tampas articuladas ou portas de acesso grandes o suficiente para realizar a limpeza e manutenção do equipamento [24].

Além da limpeza desses misturadores ser facilitada e deles apresentarem um longo tempo de vida útil, a velocidade do seu eixo de mistura é independente entre si, permitindo ajustar a sua velocidade variável e outros parâmetros de processo, de forma a garantir que eles estejam de acordo com a necessidade do processo e das suas matérias primas [23].

Ainda vale ressaltar que no caso de materiais de elevada viscosidade faz-se necessário o uso de um cilindro de descarga hidráulico especial, permitindo que o material seja drenado do misturador [23].

A fim de garantir que o misturador opere de forma segura, de modo a evitar danos aos operadores, ao meio e à sua estrutura, é importante que procedimentos operacionais de segurança e manutenções sejam realizados diariamente [25].

Os misturadores de eixo triplo possuem partes móveis, assim, deve ser garantida uma distância segura entre o operador e essas peças, de forma a evitar lesões e acidentes, especialmente no caso em que ele esteja operando a velocidades elevadas. Para isso, é importante que a sua estrutura possua grelhas e intertravamentos que impeçam o contato entre o operador e as partes móveis do equipamento [25].

Além disso, é importante que o operador tenha conhecimento sobre a sequência de adição, o tipo e a quantidade de materiais de acordo com o equipamento, de forma a evitar danos à sua estrutura e uma alimentação inadequada que ocasione a sobrecarga do sistema [25].

Por fim, os resíduos devem ser removidos do equipamento o quanto antes para evitar degradação das suas estruturas mecânicas ou até corrosão, devido ao acúmulo a longo prazo [25].

6.1. Funcionamento

O nome Triple Shaft faz alusão ao seu eixo triplo composto por uma âncora, um rotor e um dispersor de alta velocidade, assim o seu funcionamento simultâneo, juntamente com a potência considerável dos seus motores, garante uma maior eficiência e rapidez no processo de mistura [23].

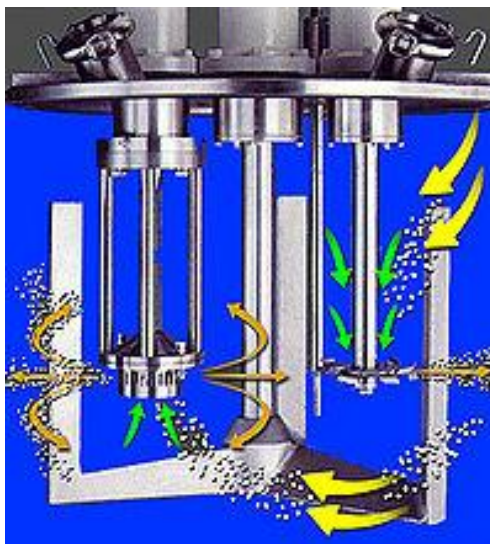
A âncora tem por objetivo direcionar o produto aos agitadores de alta velocidade, garantindo uma movimentação constante do sistema, e ainda podem apresentar raspadores de Teflon para otimizar a sua função, uma vez que eles proporcionam a raspagem das paredes laterais e do fundo do tacho, impedindo que o material fique retido nas suas paredes, potencializando o efeito da mistura [22].

O rotor tem a funcionalidade de homogeneizar e emulsionar a mistura simultaneamente à ação do dispersor ao atrair os sólidos para a superfície [26].

O dispersor é responsável por induzir um fluxo turbulento e por criar um vórtice no sistema, uma vez que este opera a uma elevada velocidade, o que permite que, com o aumento da viscosidade do sistema, a força de cisalhamento seja aplicada, além de garantir que grumos gerados ao longo do processo sejam rapidamente quebrados e desaglomerados, promovendo uma distribuição eficiente das suas partículas e a homogeneização completa da mistura [20] [27].

Dessa forma, o trabalho combinado dos eixos do misturador garante que diferentes zonas do misturador sejam homogeneizadas simultaneamente, a partir dos movimentos de rotação, dispersão e revolução de elevada velocidade, o que reduz o tempo de mistura necessário para produção do produto e aumenta a eficiência do processo [21].

Figura 11: Esquema de funcionamento do misturador do tipo Triple Shaft



Fonte: SOLIDSWIKI (2025).

Conforme apresentado na Figura 11, durante o processo o material possui movimentos radiais e axiais, de forma a proporcionar uma mistura por difusão e

cisalhamento, simultaneamente. O dispersor produz um movimento radial, o que permite que o material gire em espiral descendo até o fundo do vórtice gerado, o que, devido ao cisalhamento e atrito entre as partículas, garante uma melhor circulação do material e uma dissolução e dispersão eficiente e rápida [22].

Por fim, ao final do processo de mistura, caso o recipiente seja móvel, aciona-se o êmbolo hidráulico que permite a elevação do cabeçote do tacho, a fim de retirá-lo do misturador e realizar o envase do produto [22].

Com relação à descarga do produto, após a sua produção é possível descarregá-lo de diversas formas. A opção mais simples consiste em permitir que, a partir da gravidade, o produto flua por meio de uma válvula de descarga, indicada por uma seta na Figura 12, podendo acionar a âncora à baixas velocidades para agilizar o seu fluxo e auxiliar na sua limpeza das paredes do tacho. Nesse caso, ainda é aconselhável que o recipiente apresente um fundo côncavo, de forma a reduzir a quantidade de material retida no fundo do recipiente, sendo necessário que a âncora seja contornada, adaptando-se ao formato do tacho. No caso de produtos que apresentam maior dificuldade para fluir livremente ainda é possível aplicar pressão de ar na parte superior do misturador [24].

Figura 12: Misturador do tipo Triple Shaft com válvula de descarga por gravidade



Fonte: PHARMTECH (2020).

Além disso, também é possível instalar um sistema de descarga do tipo prensa, permitindo uma transferência e envase eficientes das misturas viscosas. Nesse caso, o tacho é posicionado abaixo do sistema de descarga e a partir de um sistema hidráulico uma placa (prensa) é baixada para dentro do tacho (Figura 13), fazendo com que o produto

seja forçado para fora por meio de uma válvula localizada na parte inferior do recipiente ou por meio de uma porta na parte superior da placa. Esse sistema é muito recomendado, uma vez que ele realiza a raspagem de materiais pegajosos e pesados do tacho e reduz o tempo gasto com a sua posterior limpeza [24].

Figura 13: Modelo de sistema de prensa para envase



Fonte: JAYGO INC. (2025).

6.2. Vantagens e desvantagens

Para definir se um misturador é vantajoso para uma aplicação específica, é essencial compreender suas vantagens e limitações operacionais.

Dentre as principais vantagens desse tipo de misturador, tem-se a sua garantia de alta eficiência de mistura, tempo de processo reduzido e produto de elevada qualidade devido a sua estrutura que garante uma distribuição homogênea e uniforme com ausência de grumos e sem pontos cegos de forma mais rápida e eficiente, sendo possível aumentar a produção e obter um produto de maior qualidade, estabilidade e durabilidade, além de resultar em uma redução de custos de mão de obra, a sua versatilidade e ampla aplicação, sendo compatível para operar com uma ampla variedade de materiais, como tixotrópicos ou de média à alta viscosidade, e adaptados para produzir diferentes tamanhos de lote, a sua garantia de uma operação segura, uma vez que são equipados com recursos e controles de segurança, a ausência de resíduos retidos na parede devido à presença de um raspador (âncora), a possibilidade de personalização da sua estrutura de acordo com a necessidade

das substâncias e do processo, podendo apresentar um controle PLC ou IHM, vácuo, estrutura à prova de explosão e construção em diversos tipos de materiais e, por fim, a sua facilidade de uso, limpeza e descarga [22] [27] [28].

Já com relação às suas principais desvantagens, destacam-se o grande espaço ocupado, os elevados gastos energéticos por poderem operar com o funcionamento simultâneo dos seus agitadores, a necessidade de manutenção considerável devido a sua maior complexidade mecânica pela presença de diversos eixos e componentes que podem ser acionados independentemente, a necessidade de um alto investimento inicial e o risco de deformação da porta do material, já que dependendo da demanda de produção do equipamento, as portas de entrada de matéria prima podem sofrer deformações com o tempo, especialmente no caso de uso intenso, o que pode afetar diretamente na sua vedação e manutenção [24] [29].

6.3. Aplicação na indústria

Os misturadores do tipo Triple Shaft são misturadores muito versáteis devido a sua capacidade de misturar e homogeneizar produtos de alta viscosidade em um curto espaço de tempo sob baixa e alta velocidade e sob vácuo, simultaneamente. Assim, esses misturadores são comumente utilizados nos setores químicos, farmacêuticos, de alimentos e de cosméticos para a produção de, por exemplo, silicones, tintas, selantes, adesivos e sistemas à base de epóxi [30].

A demanda pela produção de adesivos de alta qualidade aumentou nos últimos anos, especialmente para suprir a necessidade dos setores de embalagens e automotivo. Assim, devido a sua elevada versatilidade e capacidade de dispersão e homogeneização, os misturadores Triple Shaft são amplamente utilizados na produção eficiente de adesivos [28].

Dentre os principais fatores contribuintes para a sua utilização destaca-se o fato desses misturadores proporcionarem uma excelente dispersão, homogeneização e distribuição uniforme das suas matérias primas, de modo a evitar a formação de grumos residuais, o que leva a um adesivo de elevada qualidade, durabilidade e estabilidade, uma vez que esses são fatores determinantes na sua adesão final [28].

Além disso, esses misturadores podem ser encamisados, permitindo uma troca de calor eficiente, permitindo que a temperatura do adesivo seja controlada e se mantenha em um determinado valor desejado ao longo da produção de adesivos, o que garante uma melhor consistência do produto [28].

Por fim, a maioria dos adesivos devem apresentar uma faixa de viscosidade específica, de forma a atender às suas condições de aplicação, o que é beneficiado pelos misturadores Triple Shaft já que estes são projetados para garantir uma tensão de cisalhamento capaz de reduzir a viscosidade do produto, o que garante uma maior adesão e capacidade de espalhamento do adesivo, permitindo que ele seja aplicável em diferentes setores da indústria [28].

7. Estudos de caso: Misturadores Sigma

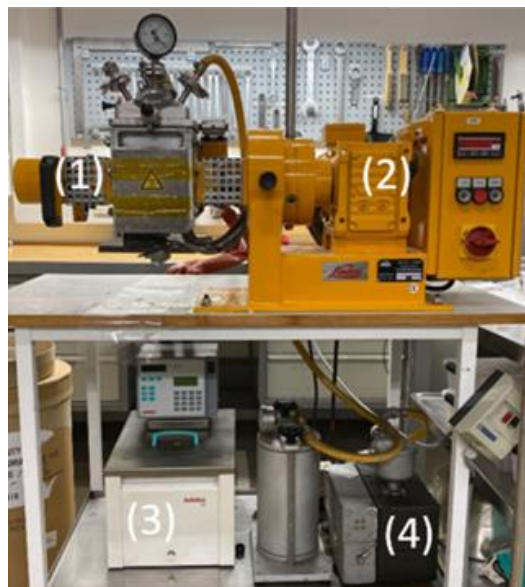
O presente capítulo se baseará em dois estudos de caso, sendo o primeiro conduzido por Larsen, M., Ottsen, T., Olofsson, E. e Spangenberg, J. com o objetivo de verificar o efeito da temperatura (aquecimento) antes e durante o processo de mistura em um misturador Sigma, bem como o efeito na qualidade do produto obtido, e o segundo conduzido por Abdillah L., Winardi S., Sumarno e Tântrico N., a fim de avaliar a influência do tempo de mistura na homogeneidade de uma suspensão gerada por um misturador Sigma de braço único para uma pasta propelente.

7.1. O efeito do aquecimento na mistura [31]

Considerando um estudo apresentado por Connelly, o estudo feito por Larsen, M., Ottsen, T., Olofsson, E. e Spangenberg, J. apresenta um novo modelo CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) não newtoniano e não isotérmico para esse sistema, considerando uma suspensão adesiva em que o aquecimento viscoso e a superfície disponível serão consideradas. Neste estudo a suspensão caracteriza-se como um fluido polimérico altamente viscoso (viscoplástico), o modelo é moldado a partir de medições ópticas de temperatura e os índices de mistura dispersiva de Zlaczower e de Kramer são considerados para examinar a qualidade da mistura.

O teste foi realizado em uma máquina “Linden LK II 1” (Figura 14). O misturador é composto por duas lâminas sigma sobrepostas e que giram em direções opostas, sendo a lâmina frontal submetida a uma velocidade de 60 rpm e a traseira de 19 rpm, e por um trocador de calor conectado à sua estrutura, de forma a permitir o ajuste de temperatura do processo. O sistema também possui uma bomba à vácuo para garantir um ambiente sem ar dentro do misturador e paredes que podem fornecer calor ao sistema, podendo fazer com que a massa atinja temperaturas de até 80°C.

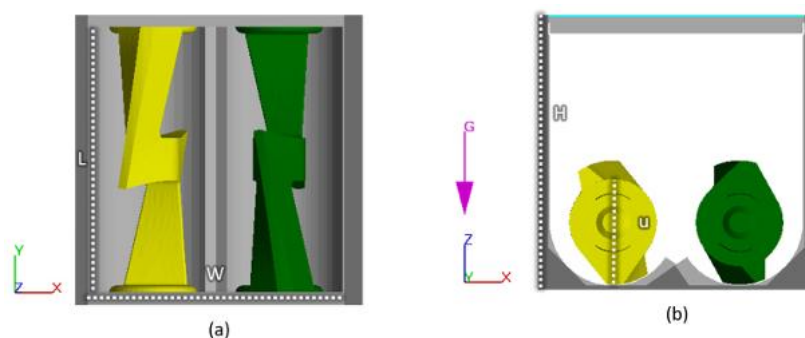
Figura 14: Configuração de mistura. (1) Misturador, (2) Painel de controle e display de temperatura, (3) Trocador de calor e (4) Bomba de vácuo



Fonte: LARSEN et al. (2023).

A partir da modelagem CFD obtida pelo software FLOW-3D foi possível obter uma ilustração do misturador, conforme apresentado na Figura 15. Considerando o tempo inicial ($t=0$), em que os braços do misturador ainda não foram acionados, os pós encontram-se acima do fluido. Quando o processo de mistura é iniciado ($t>0$), ou seja, os braços do misturador são acionados e a sua rotação é iniciada, as superfícies sólidas são submetidas a uma condição de não deslizamento.

Figura 15: Ilustração computacional do misturador Sigma, vista superior (a) e vista lateral (b)



Fonte: LARSEN et al. (2023).

Como premissas para o experimento considerou-se um fluxo não isotérmico e transiente, uma vez que a viscosidade da massa depende da temperatura, e que as

substâncias são incompressíveis, permitindo aproximar a sua densidade como constante. Essas considerações permitem que o fluxo de mistura seja calculado a partir da conservação de massa, energia e momento em diferentes condições de contorno e de temperatura iniciais, conforme apresentado na Tabela 1.

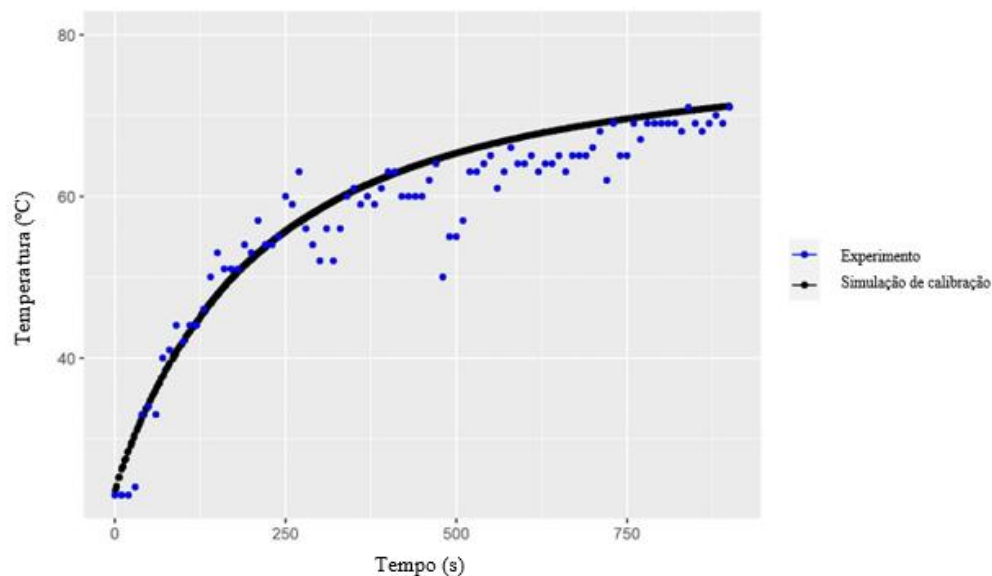
Tabela 1: Informações de condição de contorno, temperatura inicial e tempo de simulação para diferentes modelos de calibração

ID da simulação	Condição de contorno	Condição inicial	Tempo de simulação
CA23	Adiabático	23 °C	900 s
A23	Adiabático	23 °C	1800 s
A50	Adiabático	50 °C	1800 s
A80	Adiabático	80 °C	1800 s
NA23	80 °C	23 °C	1800 s
NA50	80 °C	50 °C	1800 s
NA80	80 °C	80 °C	1800 s

Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

A partir da Figura 16 é possível comparar os resultados experimentais de temperatura obtidos a partir de uma sonda de temperatura óptica localizada internamente no misturador responsável por medir a temperatura superficial da suspensão e aquela estimada pela simulação indicada acima.

Figura 16: Gráfico da temperatura superficial da mistura em função do tempo considerando resultados obtidos em experimento e em simulação de calibração, CA23



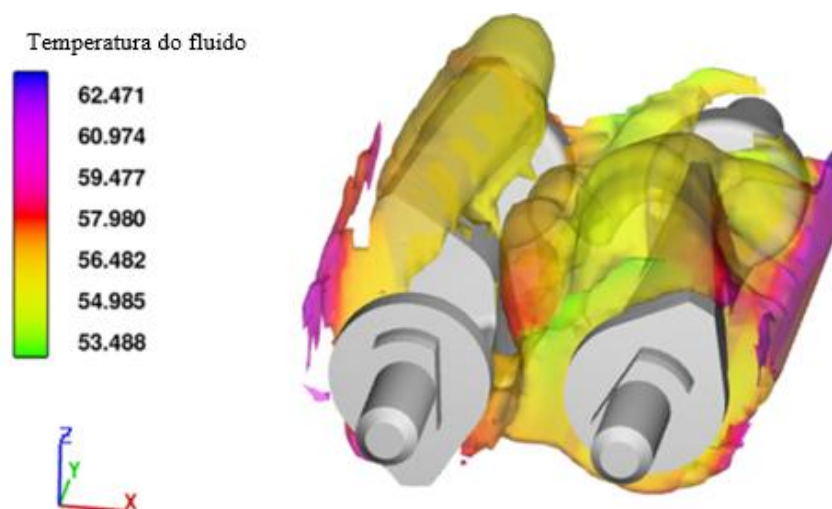
Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

Pela análise da Figura 16 observa-se que a temperatura inicial do fluido, sem a aplicação de calor durante a mistura, corresponde a 23°C e que com o passar do tempo essa temperatura aumenta, seguindo um comportamento logarítmico, sendo essa uma consequência de estar ocorrendo um aquecimento viscoso. Dessa forma, inicialmente, observa-se um aquecimento mais acentuado da mistura até que ele tenda a estabilizar-se próximo aos 70°C.

Por fim, é possível inferir que os resultados experimentais e simulados de calibração convergem entre si e o modelo apresenta um erro absoluto de 1,72°C.

Com relação à distribuição da temperatura no misturador observa-se que condições de contorno adiabáticas não são aplicáveis à mistura em questão, logo não é possível considerá-la praticamente uniforme, conforme ilustrado na Figura 17.

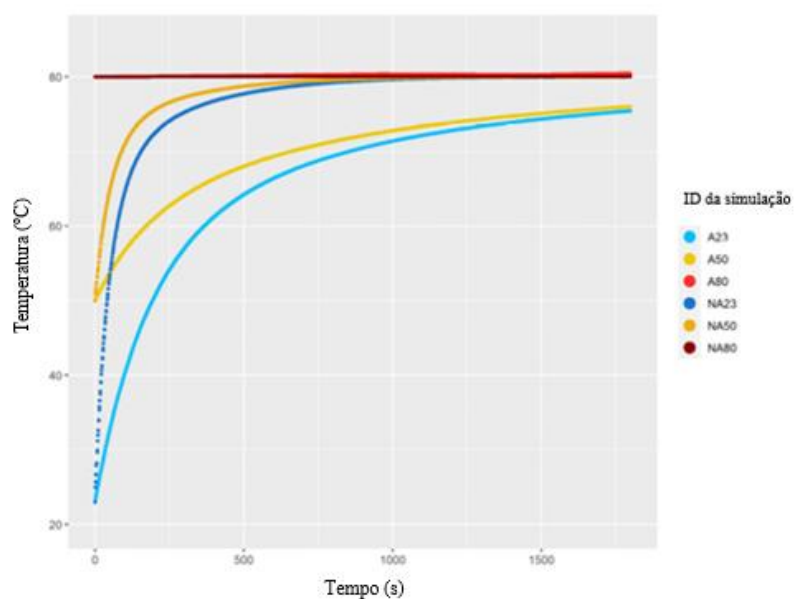
Figura 17: Perfil de temperatura da mistura para simulação NA50 em $t = 15s$



Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

A Figura 17 permite inferir que a temperatura do fluido é mais alta quando está mais próxima das paredes aquecidas do misturador e ela tende a diminuir em direção ao centro do misturador, sendo essa uma consequência da suspensão não estar sob influência direta da temperatura fixa das paredes do misturador, variável que, juntamente ao aquecimento viscoso, garante que com o passar do tempo a temperatura do sistema aumente, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18: Temperatura média da mistura em função do tempo para todas as simulações

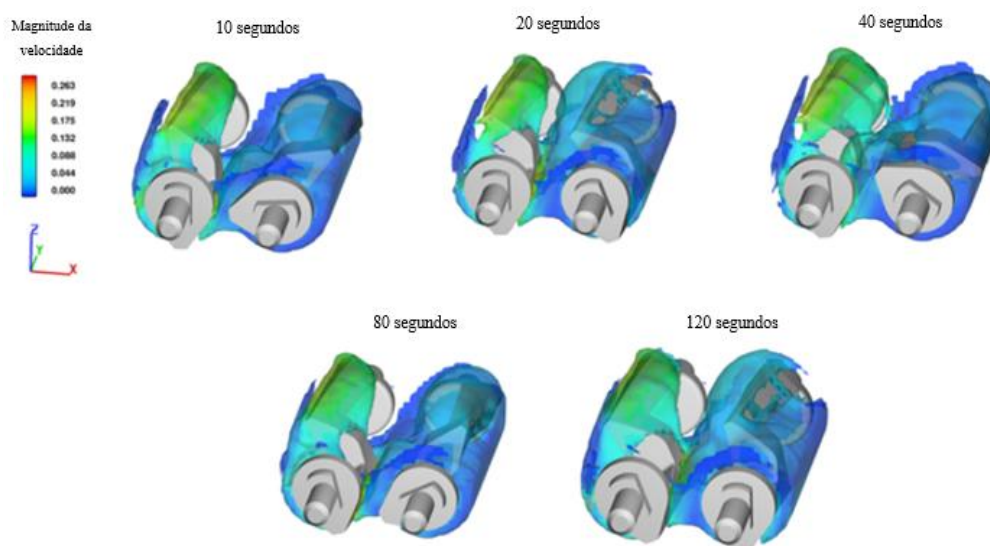


Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

A partir da Figura 18 também é possível concluir que, de forma geral, para as simulações em que a parede foi submetida à aplicação de calor, a temperatura aumentou mais rapidamente em comparação a aquelas que apresentavam condições de contorno adiabáticas.

Com relação ao fluxo de mistura dentro do misturador, é possível observá-lo na Figura 19 considerando o campo de velocidade em diferentes momentos. Assim, verifica-se que quanto menor o valor de x , mais alta será a velocidade, sendo a segunda lâmina sigma mais lenta a fim de garantir a mistura homogênea do sistema. Além disso, é evidente que, como uma consequência do efeito viscoplástico e a condição de não deslizamento nas paredes, o fluido tende a aderir-se melhor nas paredes, influenciando na sua velocidade que será reduzida.

Figura 19: Perfil de velocidade (m/s) para a simulação A80 em diferentes tempos

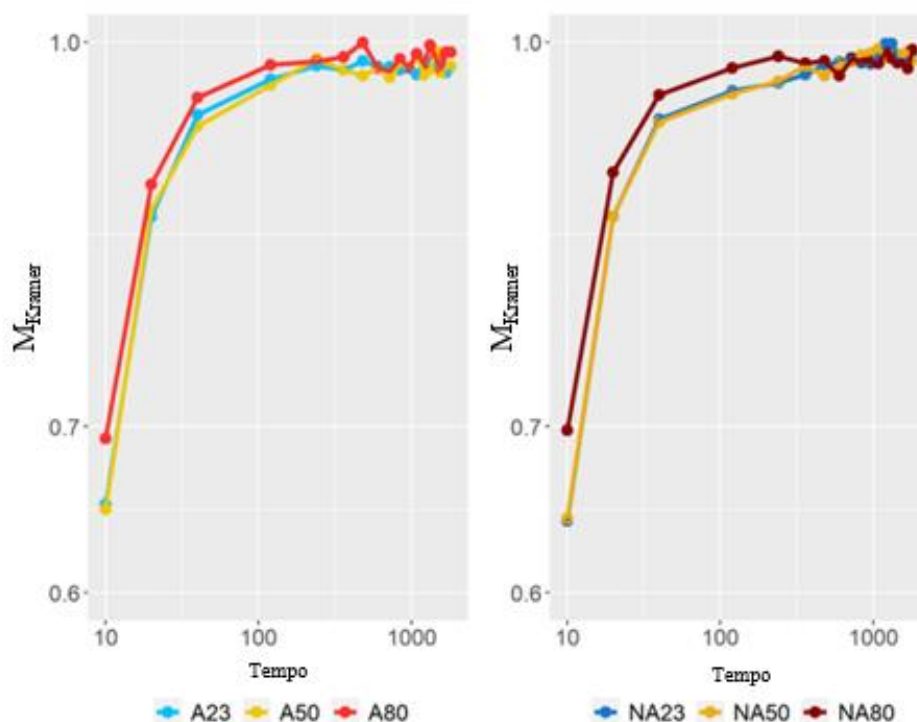


Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

Por fim, é importante analisar a qualidade da mistura considerando parâmetros de mistura distributiva e dispersiva.

A mistura distributiva pode ser analisada pelo coeficiente de mistura de Kramer (M_{Kramer}), assim foi gerado o gráfico apresentado na Figura 20 indicando a variação desse parâmetro com o tempo para as diferentes simulações. Quanto maior o coeficiente (próximo ou igual a 1) mais bem distribuída está a suspensão, indicando uma mistura eficiente.

Figura 20: Coeficiente de mistura de Kramer (M_{Kramer}) com o tempo, para diferentes simulações



Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

Pela análise da Figura 20 observa-se que as simulações A80 e NA80 atingiram valores do coeficiente de Kramer mais elevados em um menor espaço de tempo, o que se acredita ser uma consequência da temperatura elevada dessas simulações, o que reflete na viscosidade da mistura que será mais baixa. Contudo, apesar dessa variação observada, verifica-se que a variação do coeficiente de Kramer entre as diferentes simulações é muito pequena, tornando-a pouco significativa.

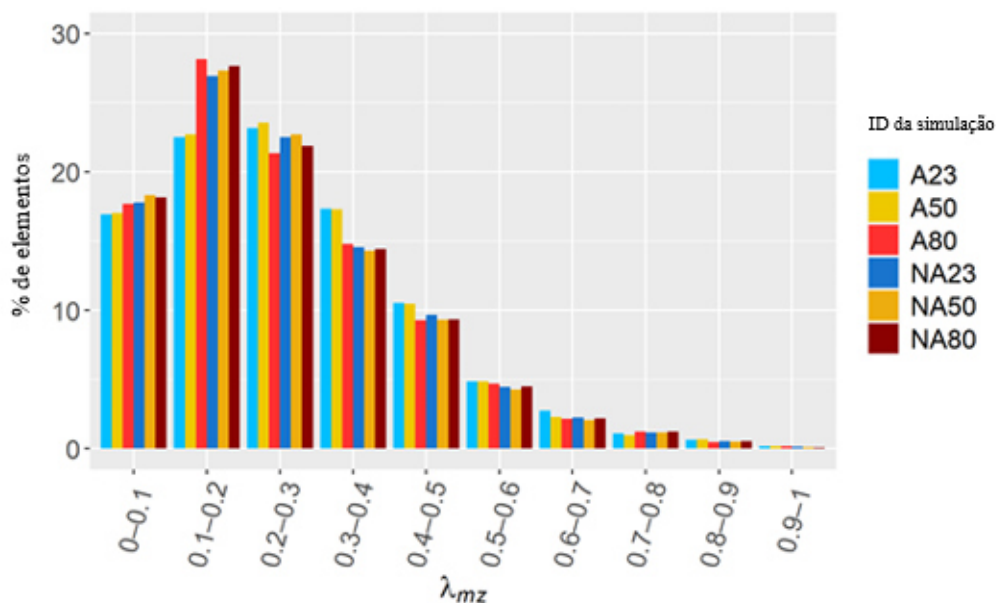
Dessa forma, é possível concluir que não é necessário pré-aquecer nem aplicar calor durante o processo de mistura para garantir uma boa dispersão da suspensão, permitindo economizar energia e tempo no processo.

Ainda vale ressaltar que, considerando uma velocidade constante dos braços do misturador, as lâminas demandam mais energia e força motriz a baixas temperaturas, uma vez que nessa situação a sua viscosidade aumenta, o que pode impactar negativamente na vida útil delas.

A mistura dispersiva pode ser analisada a partir do coeficiente de mistura de Manas-Zlacower (λ_{mz}), assim foram gerados os gráficos apresentados na Figura 21 e Figura 22. Quanto maior o coeficiente (próximo ou igual a 1) significa que a mistura é acionada por

cisalhamento e puramente elástica, indicando que a quebra dos aglomerados da suspensão é realizada de forma mais rápida.

Figura 21: Histograma do coeficiente de mistura de Manas-Zlacover em $t = 1800s$

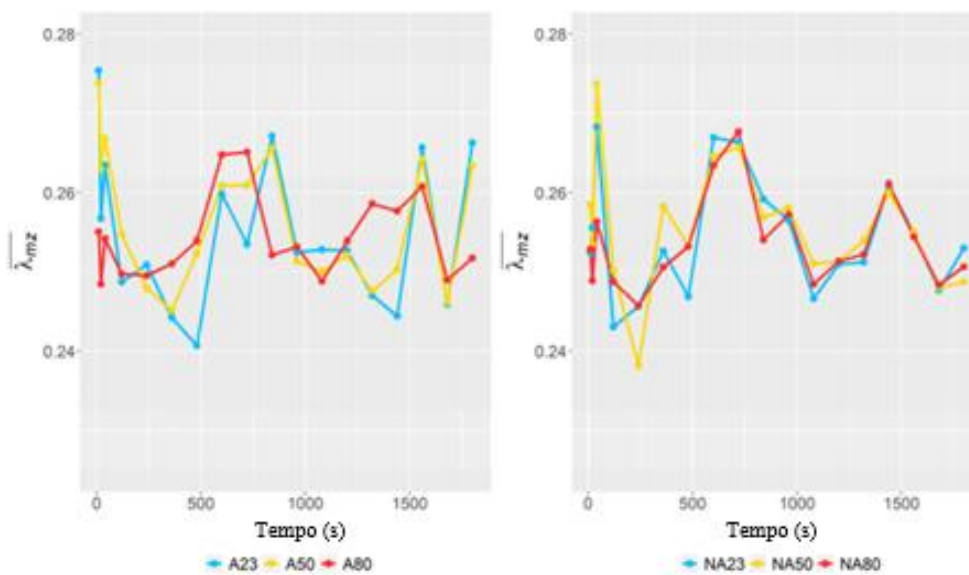


Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

Pela análise da Figura 21, observa-se uma variação muito baixa da porcentagem de elementos para um mesmo valor do coeficiente em diferentes simulações, indicando que, assim como na mistura distributiva, o pré-aquecimento e aquecimento durante o processo não agrega nem influencia muito na qualidade da mistura.

Pelo histograma verifica-se que o índice de mistura dispersiva se encontra em sua maioria entre a faixa de 0 a 0,5. Esta informação é coerente com o estudo realizado por Ahmed e Chandy, mas inconsistente àquele apresentado Connely e Kokini, uma vez que neste último caso foi estudado um misturador Sigma totalmente cheio. Assim, é possível concluir que a dispersão da mistura é desfavorecida em misturadores parcialmente cheios.

Figura 22: Valor médio do coeficiente de mistura de Manas-Zlacower com o tempo



Fonte: Adaptado de LARSEN et al. (2023).

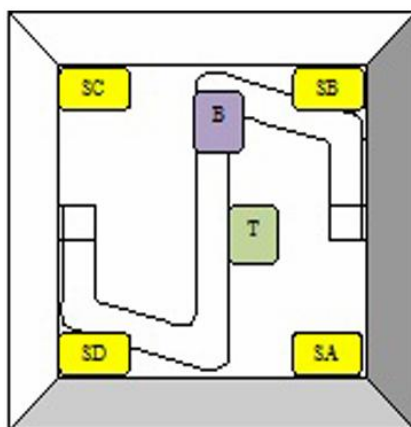
Pela análise da Figura 22, observa-se o mesmo comportamento de baixa variação do coeficiente com o aumento da temperatura, variando em cerca de 10% entre os diferentes modelos, sendo isso uma provável consequência de o misturador estar parcialmente cheio, fazendo com que existam pontos na superfície com ausência de mistura.

Por fim, o estudo conclui que em um sistema não isotérmico e não newtoniano em que o misturador Sigma está parcialmente cheio, o índice de mistura dispersiva entre 0 e 0,5 e o índice de mistura de Kramer, nas diferentes simulações, a suspensão se encontrou bem distribuída e homogênea após 1800s. Além disso, concluiu-se que o pré-aquecimento da mistura e o aquecimento das paredes do misturador não leva a um ganho significativo na rapidez com que uma mistura distributiva e dispersiva seria obtida em casos em que o misturador se encontra parcialmente cheio, permitindo eliminar o aquecimento do processo, economizando-se tempo e energia.

7.2. Avaliação do tempo de mistura [32]

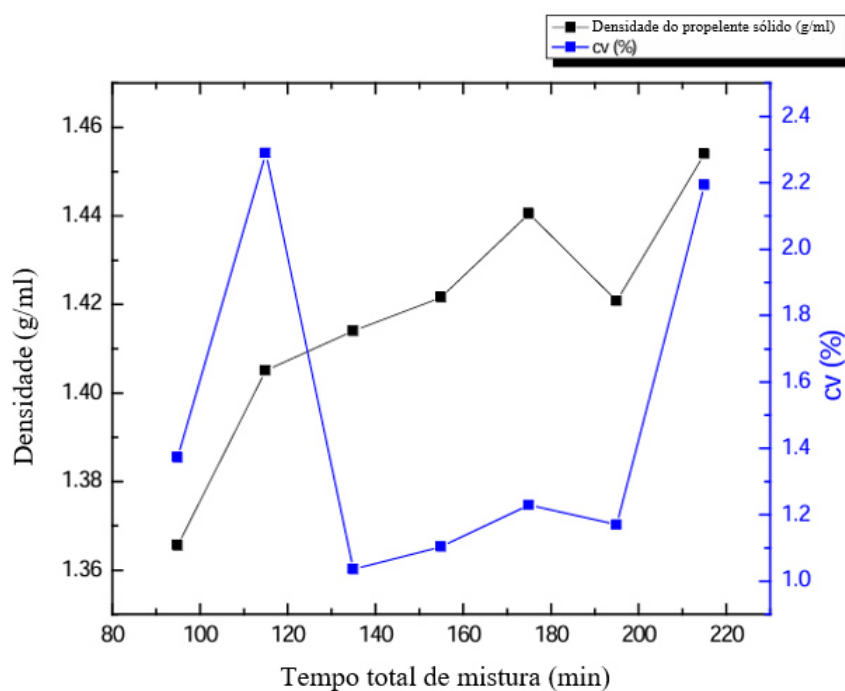
A princípio, realizou-se o processo de mistura em diversas etapas e avaliou-se a homogeneidade da suspensão final a partir da sua densidade em seis pontos diferentes do misturador (Figura 23). A Figura 24 apresenta os resultados de densidade obtidos para o propelente sólido.

Figura 23: Pontos de amostragem no misturador Sigma durante produção de uma pasta propelente



Fonte: ABDILLAH, WINARDI e SUMARNO (2017).

Figura 24: Variação de densidade do propelente sólido e do coeficiente de variação (cv) em função do tempo total de mistura



Fonte: Adaptado de ABDILLAH, WINARDI e SUMARNO (2017).

O coeficiente de variação (CV) determina a uniformidade dos dados obtidos na mistura, de forma que quanto menor ele for menos o conjunto de dados se difere um do outro, indicando uma menor diversidade e maior grau de homogeneidade. Dessa forma, pela análise da Figura 24, observa-se que o valor de CV apresentou variações com o aumento do tempo de mistura, mas manteve-se praticamente constante entre 135 e 195 minutos, indicando que a pasta já se encontrava homogênea.

Ainda vale ressaltar que após a condição ideal ser estabelecida o valor de CV aumentou, resultando em uma redução na homogeneidade da suspensão com o aumento do tempo, o que sugere a possibilidade de haver mais sólido na amostra da pasta analisada.

Dessa forma, o estudo conclui que o tempo de mistura em um misturador Sigma influencia na densidade e conseqüentemente na homogeneidade da mistura, apresentando um tempo ideal de mistura para se obter uma maior homogeneidade da suspensão. Para o sólido propelente observou-se um aumento na densidade e uma conseqüente redução na sua homogeneidade com o aumento do tempo de mistura, sendo o seu tempo ideal e mistura igual a 135 minutos, o tempo em que a mistura começou a apresentar o seu maior grau de homogeneidade.

8. Estudos de caso: Misturadores Triple Shaft

O presente capítulo se baseará em dois estudos, sendo o primeiro conduzido por Schwarz B., Kniele H. e Lindner J. A., em que um misturador multifuncional foi desenvolvido com o intuito de validar quais são os melhores pontos de operação do misturador alterando-se o ângulo das pás do agitador principal e o segundo por Cohen D., Ross C. e Co S. a fim de avaliar entre o misturador Dual Shaft e Triple Shaft qual apresenta melhor custo benefício para a produção de uma membrana a ser utilizado em um sistema de filtração por osmose reversa.

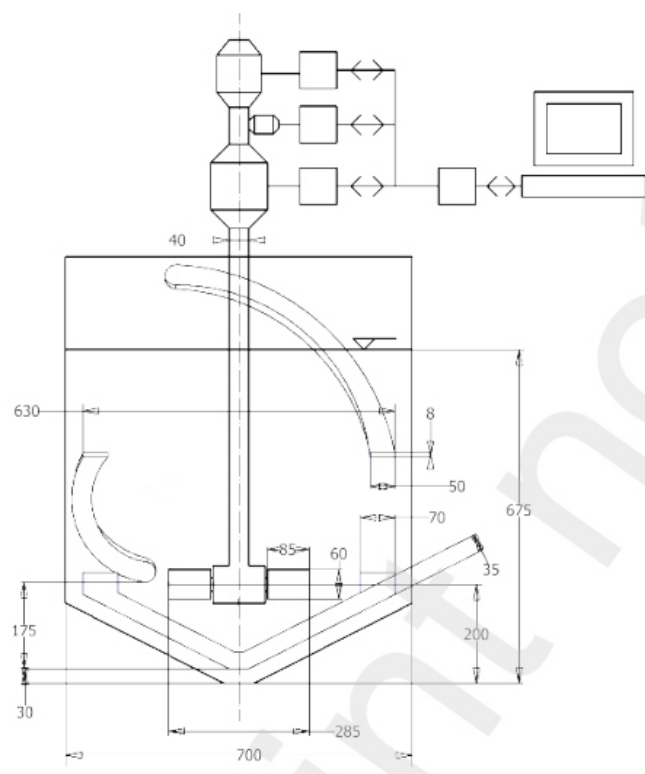
8.1. Pontos ótimos de operação do misturador [33]

O estudo de Schwarz B., Kniele H. e Lindner J. A. foi realizado, inicialmente, considerando um misturador de eixo duplo (Dual Shaft), sendo ao final verificado que o comportamento e as características de potência dos misturadores do tipo Triple Shaft (agitador multifuncional de três eixos) são semelhantes àquelas obtidas para os misturadores Dual Shaft.

O experimento foi desenvolvido a partir de um misturador multi-eixos (dois eixos concêntricos independentes) com volume de 200 L desenvolvido com a empresa Kniele GmbH, sendo ele composto por um agitador primário (agitador de alto cisalhamento de duas pás com inclinação adaptável, podendo atuar como uma turbina de pás planas (FBT) ou uma turbina de pás inclinadas (PBT)) e um agitador secundário (uma fita helicoidal com dupla hélice e âncora), sendo a sua velocidade de operação controlada a partir de um computador.

A Figura 25 apresenta um esquema do misturador bem como as suas dimensões de montagem e a Figura 26 o misturador desenvolvido com a empresa Kniele GmbH.

Figura 25: Esquema do misturador multi-eixos



Fonte: SCHWARZ, KNIELE e LINDNER (2025).

Figura 26: Misturador multi-eixos desenvolvido com a empresa Kniele GmbH



Fonte: SCHWARZ, KNIELE e LINDNER (2025).

O fluxo gerado pelo agitador secundário depende do sentido de rotação devido ao passo da hélice e o fluxo gerado pelo agitador primário depende do passo da hélice, do

seu sentido de rotação e do tipo de agitador que está sendo aplicado, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Características dos fluxos gerados para diferentes tipos de rotação

Tipo de agitador/rotação	Sentido horário	Sentido anti-horário
Principal com pás planas (0° ou 180°)	Radial	Radial
Principal com pás inclinadas (45°)	Fluxo ascendente	Fluxo descendente
Principal com pás inclinadas (135°)	Fluxo descendente	Fluxo ascendente
Secundário	Fluxo ascendente	Fluxo descendente

Fonte: Adaptado de SCHWARZ, KNIELE e LINDNER (2025).

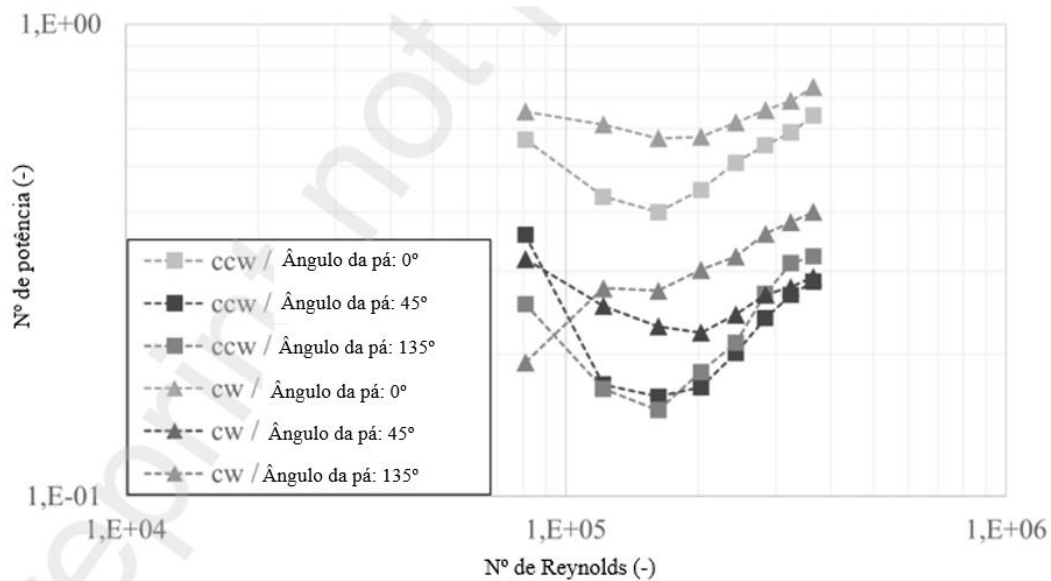
Além disso, a fim de encontrar o melhor parâmetro de entrada utilizou-se um algoritmo de auto-otimização. Dessa forma, os atuadores que influenciam nos parâmetros de processo garantem que o controlador mantenha o parâmetro de entrada e passe para o próximo atuador quando o modo ótimo de operação é encontrado.

Por fim, os experimentos foram conduzidos utilizando água como fluido.

Inicialmente, analisou-se e estudou-se os agitadores separadamente de forma a avaliar as suas características de potência individuais.

O agitador principal possuía diferentes inclinações das pás, assim o seu fluxo foi apresentado na Tabela 2 e a Figura 27 apresenta as suas características de potência ao girar no sentido anti-horário (ccw) e horário (cw) em um regime turbulento em que o agitador secundário manteve-se em repouso, atuando como um defletor.

Figura 27: Característica de potência do agitador principal para diferentes velocidades de rotação e ângulos das pás

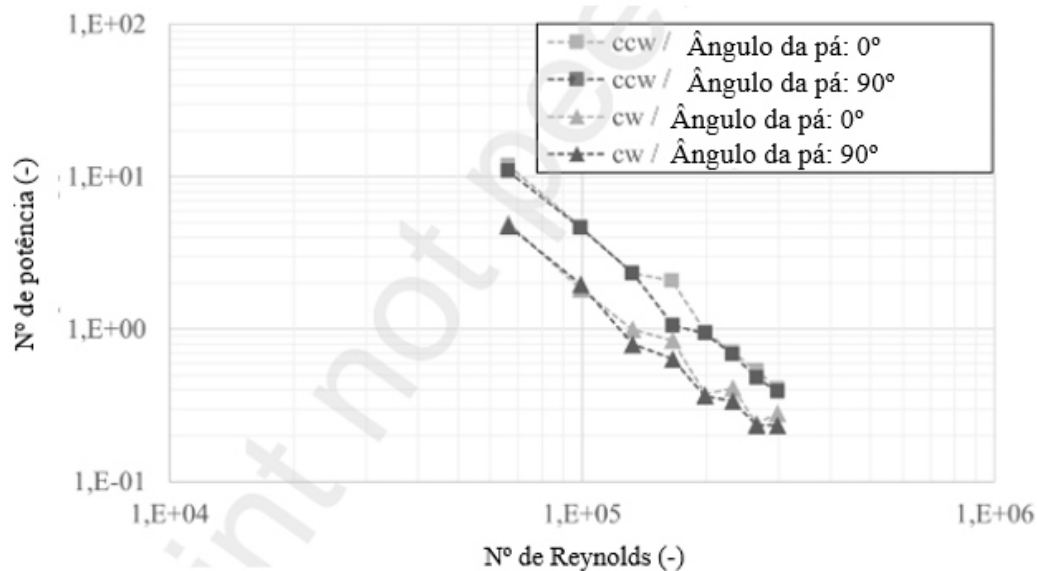


Fonte: Adaptado de SCHWARZ, KНИЕLE e LINDNER (2025).

Pela análise da Figura 27 verifica-se que a maior potência de entrada foi obtida pelo agitador de pás planas na orientação vertical. Já para as pás inclinadas, obteve-se um melhor resultado para as lâminas operando à 135° em regimes mais turbulentos em comparação com as lâminas de 45°. Com relação ao sentido de operação, a maior potência foi obtida para agitadores operando no sentido horário (indicado pelo triângulo).

Para a análise da influência do agitador secundário nas características de potência do sistema, considerou-se um sistema em que se variou o sentido de rotação e o alinhamento das pás do agitador principal, variando o seu ângulo para 0° (sentido vertical) e 90° (sentido horizontal), conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28: Característica de potência do agitador secundário para diferentes sentidos de rotação e ângulos das pás do agitador principal



Fonte: Adaptado de SCHWARZ, KNIELE e LINDNER (2025).

As pás planas no sentido vertical ofereceram maior resistência ao fluxo do sistema e as pás planas no sentido horizontal um alinhamento na direção do fluxo.

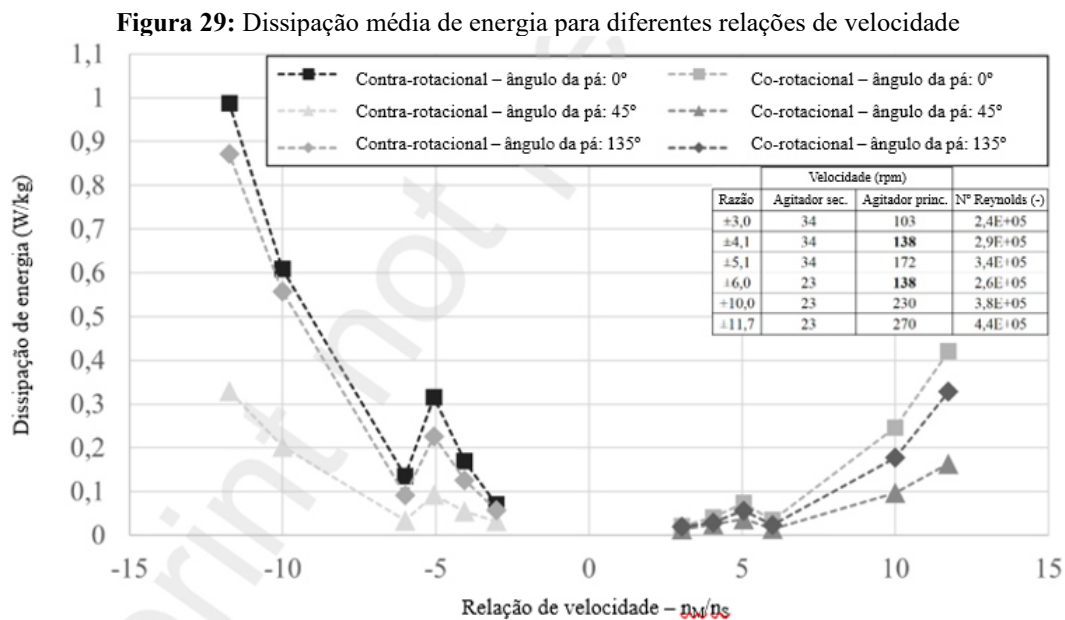
Pela análise da Figura 28, observa-se que, ao contrário do resultado apresentado pelo agitador principal, o agitador secundário apresenta um melhor resultado para a rotação no sentido anti-horário, uma vez que a rotação contrária à inclinação da hélice gera um coeficiente de arrasto maior.

Além disso, verifica-se que a potência introduzida no fluido diminui com o aumento da velocidade do sistema, sendo essa uma consequência do vórtice potencial gerado e à baixa geração de turbulência.

Após análise individual dos agitadores principal e secundário, avaliou-se a sua interação e atuação conjunta (co-rotacional) e contrária (contra-rotacional), considerando-se a influência do movimento do agitador secundário no consumo de energia do agitador principal e vice-versa.

Assim, os testes foram realizados em um fluxo altamente turbulento e assumindo-se que o agitador principal opera como uma turbina de pás inclinadas (45° e 135°) e uma turbina de pás planas (0°) girando em sentido horário enquanto o agitador secundário opera no sentido horário (co-rotacional) e no sentido anti-horário (contra-rotacional).

A Figura 29 apresenta os resultados obtidos para a dissipação média de energia esperada, bem como as velocidades utilizadas, sendo para o agitador secundário utilizadas apenas duas velocidades, 23 rpm e 34 rpm, e a velocidade do agitador principal de acordo com a razão de velocidade alvo.



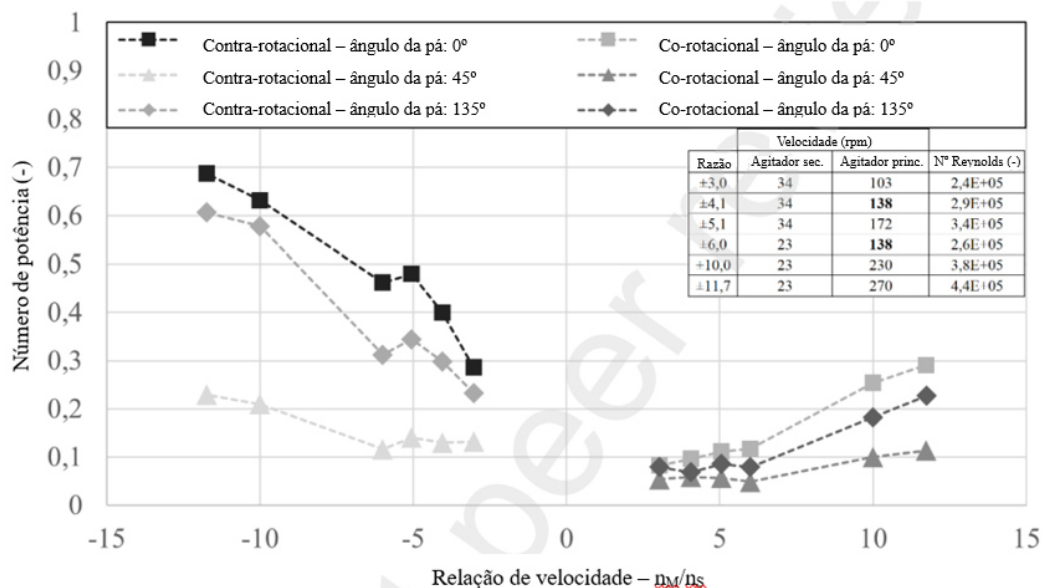
Fonte: Adaptado de SCHWARZ, KNIELE e LINDNER (2025).

Pela Figura 29 observa-se que a velocidade negativa está associada ao modo contra-rotacional e que esse mesmo modo de operação permite uma dissipação de energia maior em um menor espaço de tempo, em comparação com o modo co-rotacional que atinge apenas metade da energia dissipada considerando a mesma razão de velocidade.

Além disso, observa-se que para as relações de velocidade 4 e 6 a velocidade do agitador principal se mantém em 138 rpm, o que resultou em uma pequena queda na dissipação de energia do sistema para todas as suas configurações e modos de mistura.

Assim, de forma geral, é possível concluir que a dissipação de energia aumenta de forma considerável com a velocidade do agitador principal, sendo ela resultado principalmente do modo contra-rotacional em velocidades mais elevadas de ambos os misturadores, sendo o agitador principal operado na condição de pás verticais (0°).

As características de potência também podem ser avaliadas considerando o número de potência do sistema, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 30: Número de potência para diferentes relações de velocidade

Fonte: Adaptado de SCHWARZ, KNIELE e LINDNER (2025).

Pela Figura 30 observa-se que o número de potência sempre aumenta com o aumento da relação de velocidade dos agitadores.

Assim, os autores concluem que a melhor forma de operação do sistema ocorre a partir da configuração do agitador principal e secundário na maior relação de velocidade e em modo contra-rotacional e com o agitador principal com as pás verticais (0°), tanto para o misturador do tipo Dual Shaft quanto para o Triple Shaft.

8.2. Misturador Dual Shaft versus Triple Shaft [34]

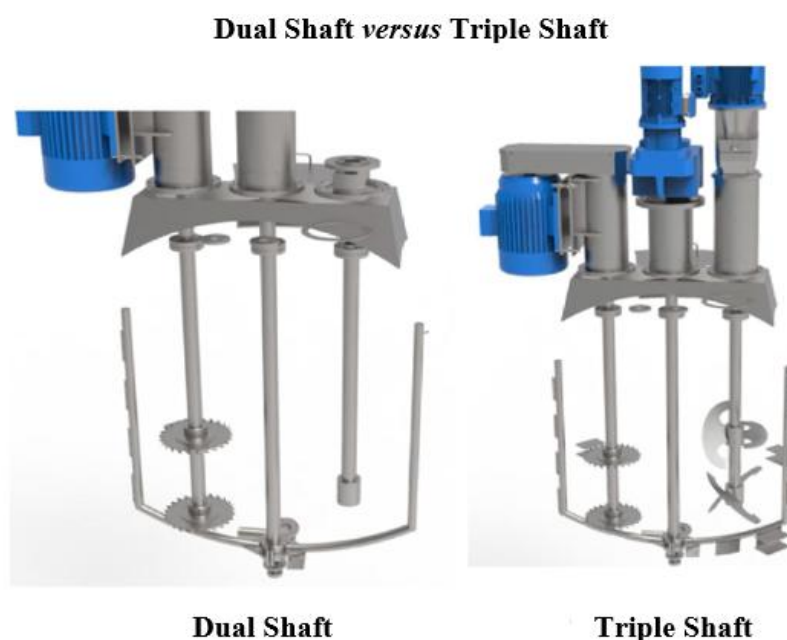
Apesar do misturador Dual Shaft e Triple Shaft serem indicados para misturas em que se deseja garantir uma dispersão contínua e homogênea, em alguns casos o custo-benefício de se utilizar um misturador Triple Shaft é mais vantajoso.

A fim de elaborar um dispositivo de filtragem compacto, versátil e eficiente, capaz de ser utilizado por soldados americanos durante as suas missões para obtenção de água em situações de crise, a empresa Hydration Technologies desenvolveu um sistema de filtragem com base no conceito de osmose reversa, o filtro HTI.

Inicialmente, testou-se a produção da membrana em um misturador de eixo duplo (Dual Shaft), uma vez que, segundo Steve Peterson, estes misturadores são, em geral, versáteis, rápidos e apresentam um bom custo-benefício [34]. O teste foi realizado em um recipiente aberto e levou seis horas para gerar uma dispersão final insatisfatória.

Com a falha do teste em um misturador do tipo Dual Shaft, buscou-se avaliar a produção em um misturador de eixo triplo (Triple Shaft), uma vez que ele combina três agitadores controlados independentes: um dispersor de alta velocidade, um rotor/estator de alto cisalhamento e uma âncora de baixa velocidade. Além disso, o modelo utilizado era um sistema fechado que permitia o controle térmico da mistura, uma vez que o polímero de acetato de celulose é sensível ao calor.

Figura 31: Esquema de estrutura do misturador do tipo Dual Shaft e Triple Shaft



Fonte: INDUSTRIAL QUICK SEARCH (2025).

A presença de um rotor/estator garantiu um maior cisalhamento à mistura, uma vez que ele permitiu que todos os grânulos do polímero fossem quebrados e homogeneizados, e o dispersor e a âncora mantiveram um fluxo constante à mistura, garantindo uma maior homogeneidade da suspensão. Dessa forma, o lote ficou pronto em duas horas e gerou um produto satisfatório.

Portanto, o estudo conclui que o misturador do tipo Triple Shaft apresenta um resultado mais vantajoso e satisfatório do que a produção em um misturador do tipo Dual Shaft, em especial devido à presença do rotor na sua estrutura. Segundo Peterson, a produção em Dual Shaft gerava esferas de gel que promoviam uma barreira e resistência à dispersão e umectação da mistura, a qual foi eliminada com a atuação do alto cisalhamento promovido pelo rotor.

9. Conclusão

A análise dos estudos de caso apresentados ao longo deste trabalho permitiu compreender de forma aprofundada a importância dos misturadores do tipo Sigma e Triple Shaft para a indústria química e setores correlatos. Observou-se que o desempenho desses equipamentos está diretamente relacionado às características físico-químicas dos materiais processados, como viscosidade, comportamento reológico e presença de fases sólidas, bem como às condições operacionais exigidas pelo processo. Os resultados discutidos evidenciam que os misturadores Sigma apresentam elevada eficiência na homogeneização de materiais altamente viscosos, sendo particularmente adequados para aplicações que demandam robustez operacional e estabilidade do produto. Por outro lado, os misturadores Triple Shaft destacam-se pela versatilidade e pela elevada eficiência de mistura, permitindo o processamento de sistemas mais complexos, além da possibilidade de operação sob aquecimento, resfriamento e vácuo.

Portanto, os estudos de caso reforçam que a escolha do misturador deve ser realizada de maneira criteriosa, considerando os objetivos do processo, as propriedades do material e as exigências de qualidade e produtividade. Assim, tanto os misturadores Sigma quanto os Triple Shaft desempenham papel fundamental na otimização dos processos industriais, contribuindo para o aumento da eficiência produtiva, a redução de desperdícios, o melhor aproveitamento energético e a obtenção de produtos com qualidade e desempenho adequados às exigências do mercado.

Por fim, é importante ressaltar que, a fim de complementar os estudos abordados no presente trabalho, recomenda-se que no futuro sejam realizadas avaliações sobre a influência do aquecimento durante o processo e pré-aquecimento em misturadores sigma preenchidos em sua capacidade total e sobre o desempenho de diferentes tipos e configurações dos impelidores para o misturador Triple Shaft. Além disso, seria relevante desenvolver um estudo comparativo entre o desempenho energético e a eficiência de mistura desses equipamentos em diferentes escalas industriais.

REFERÊNCIAS

1. **Chi Yu Mixer**, 18 Dezembro 2024. Disponível em: <<https://www.chiyumixer.com/news/what-is-the-purpose-of-industrial-mixer.html>>. Acesso em: 23 Junho 2025.
2. **Farfly Mill**, 23 Janeiro 2025. Disponível em: <<https://www.farflymill.com/what-is-an-industrial-mixer%EF%BC%9F/>>. Acesso em: 273 Juno 2025.
3. **Yuxiang**, 18 Julho 2024. Disponível em: <<https://www.yuxiangmachinery.com/article/detail/the-role-of-industrial-chemical-mixers-in-the-chemical-industry.html>>. Acesso em: 29 Junho 2025.
4. **Anderson Process**, 15 Dezembro 2022. Disponível em: <<https://www.andersonprocess.com/its-in-the-mix-industrial-mixers-defined-types-and-applications/>>. Acesso em: 29 Junho 2025.
5. **MXD Process**, 9 Novembro 2023. Disponível em: <<https://www.mxdprocess.com/blog/types-of-industrial-mixers>>. Acesso em: 2025 Junho 29.
6. **Grupo Idugel**, 23 Fevereiro 2023. Disponível em: <<https://idugel.com.br/en/mixer-industrial/>>. Acesso em: 29 Junho 2025.
7. PAUL, J. **PerMix**, 15 Novembro 2023. Disponível em: <<https://www.permixmixers.com/the-role-of-sigma-mixers-in-silicone-and-adhesive-manufacturing/>>. Acesso em: 22 Maio 2025.
8. **Reynolds Industries**. Disponível em: <<https://reynoldsmixers.com/sigma-blade-mixers.php>>. Acesso em: 25 Maio 2025.
9. ABSTER. **Abster Equipment**, 6 Outubro 2021. Disponível em: <<https://abfeng.in/faq-items/what-is-sigma-mixer/>>. Acesso em: 25 Maio 2025.
10. **Unique Mixers**. Disponível em: <<https://uniquemixer.com/product-Sigma-Mixers>>. Acesso em: 21 Maio 2025.
11. **Adinath International**. Disponível em: <<https://www.adinath.co.in/chemical-machinery/sigma-mixer-machine/>>. Acesso em: 26 Maio 2025.
12. **EXACT MIXING**, Junho 2016. Disponível em: <<https://www.exactmixing.com/wp-content/uploads/2018/07/Exact-Mixer-Energy-Consumption-Comparison.pdf>>. Acesso em: 26 Maio 2025.

13. **Adinath International**. Disponível em: <<https://www.adinath.co.in/articles-pharmaceutical-machinery/sigma-mixer-design-construction-applications-explained/>>. Acesso em: 26 Maio 2025.
14. **Karvil**, 12 Julho 2024. Disponível em: <<https://www.karvil.com/What-is-a-Sigma-Mixer-id48811176.html>>. Acesso em: 25 Maio 2025.
15. **Abster Equipments**. Disponível em: <<https://www.sigmamixeremachine.com/sigma-mixer-working.html>>. Acesso em: 26 Maio 2025.
16. **ABSTER. Abster Equipment**, 26 Fevereiro 2023. Disponível em: <<https://abfeng.in/sigma-mixer-design-operation-applications/>>. Acesso em: 25 Maio 2025.
17. **Simpstek Machinery**. Disponível em: <<https://www.labkneader.com/what-is-a-sigma-mixer-exploring-its-role-in-industrial-mixing/>>. Acesso em: 26 Maio 2025.
18. **Franli**. Disponível em: <<https://www.franli.com/sigma-mixer-3/>>. Acesso em: 26 Maio 2025.
19. **JOSHI, G.** Disponível em: <https://mlsu.ac.in/econtents/924_Semisolid%20mixing.pdf>. Acesso em: 26 Maio 2025.
20. **Ross**. Disponível em: <<https://www.mixers.com/products/multi-shaft-mixers/triple-shaft-mixer/>>. Acesso em: 27 Maio 2025.
21. **Karvil**. Disponível em: <<https://www.karvil.com/Industrial-Multi-function-Triple-Shaft-Mixer-for-High-Viscosity-Materials-pd42891010.html>>. Acesso em: 29 Maio 2025.
22. **SIEHE**. Disponível em: <https://siehegroup.com/product_detail/tri-shaft-multi-functional-mixer>. Acesso em: 29 Maio 2025.
23. **Unique Mixers**. Disponível em: <<https://uniquemixer.com/product-Triple-Shaft-Mixer>>. Acesso em: 28 Maio 2025.
24. **BANASZEK, C. ASI ADHESIVES & SELANTS**, 1 Abril 2011. Disponível em: <<https://www.adhesivesmag.com/articles/89774-a-closer-look-at-multi-shaft-mixers>>. Acesso em: 1 Junho 2025.

25. **FARFLY**, 3 Janeiro 2025. Disponível em: <<https://www.farflymill.com/how-to-operate-the-mixer-safely/>>. Acesso em: 1 Junho 2025.
26. **Ross**, 13 Janeiro 2022. Disponível em: <<https://www.mixers.com/company/news/ross-versa-mix-triple-shaft-mixer-for-challenging-mixing-applications/>>. Acesso em: 28 Maio 2025.
27. **FRANLI**. Disponível em: <<https://www.franli.com/triple-shaft-mixer-1/>>. Acesso em: 1 Junho 2025.
28. **FRANLI**. Disponível em: <<https://www.franli.com/triple-shaft-mixer-3/>>. Acesso em: 1 Junho 2025.
29. **Zhenying Mechanical Equipment Co.**, 13 Agosto 2019. Disponível em: <<https://www.sinobeltconveyor.com/posts/advantages-disadvantages-various-mixers/>>. Acesso em: 1 Junho 2025.
30. **Sozer**. Disponível em: <<https://en.sozer.com/sm-3mil-series-triple-shaft-mixers/>>. Acesso em: 28 Maio 2025.
31. LARSEN, M. R. et al. Numerical Modeling of the Mixing of Highly Viscous Polymer. **MDPI**, Dinamarca, 19 Abril 2023. 12. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/15/8/1938>>. Acesso em: 28 Setembro 2025.
32. ABDILLAH., L. H.; WINARDI, S.; SUMARNO, T. N. IPTEK. **IPTEK**, 3 Agosto 2017. Disponível em: <<https://iptek.its.ac.id/index.php/jps/article/view/3515/2708>>. Acesso em: 3 Novembro 2025.
33. SCHWARZ, B.; KNIELE, H.; LINDNER, J. A. SSRN. **SSRN**, 14 Junho 2025. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5295310>. Acesso em: 25 Outubro 2025.
34. COHEN, D.; ROSS, C.; CO, S. **Chemical Processing**, Outubro 2004. Disponível em: <https://integralpx.com/wp-content/uploads/Ross_Mixers_case_study_soldiers_drinking_water.pdf>. Acesso em: 5 Novembro 2025.
35. CONNELLY, R. K.; KOKINI, J. L. Wiley Online Library, 24 Julho 2006. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adv.20071>>. Acesso em: 3 Novembro 2025.